

Analysis on Solid Insulator Flashover Characteristics on Moisture Contamination for Electrical Insulation Improvement of ESS

ESS 안전성 개선을 위한 결로 운전 조건 고려 고체절연물 연면 절연파괴특성 분석

Jin-Tae Kim, Seung-Yong Lee, Ji-young Kim, Bok Yeol Seok
김진태, 이승용, 김지영, 석복렬

Abstract

As the large-scale renewable energy power plant increases, the high-capacity and compact Energy Storage System (ESS) is required. However, this trend could reduce the insulation reliability of ESS. In this study, the surface flashover characteristics for four types of solid insulators are investigated in the uniform electric field with AC and Lightning Impulse (LI) voltage waveforms under various contamination levels. In addition, insulator surfaces are compared based on the contact angle before and after surface flashover. The experimental results show that AC flashover voltage is dependent on the materials and the contamination level, but LI flashover voltage is only associated with the contamination level. Especially, AC flashover voltage of PC (PolyCarbonate) is higher than that of other insulators, which is associated with the unique and sequential creepage discharge propagation pattern of PC. The localized discharges on the surface of PC form corresponding tracking points. Then, the interconnected trackings result in the complete flashover. This flashover patterns degrade the surface of PC much more than that of epoxy and Bulk Molding Compound (BMC). Thus, the contact angle of PC is significantly reduced compared to that of other insulators. The increased hydrophilicity in the surface of PC enhances the insulator surface conductivity.

Keywords: Energy Storage System, ESS, Power Smoothing, Flashover, Solid Insulator, Breakdown, Contamination

I. Introduction

신재생에너지의 보급을 위한 정부의 2030 정책과 더불어, 태양광 및 풍력 등 청정에너지에 대한 관심이 고조됨에 따라 재생에너지의 발전 비율이 증가하고 있다. 출력 변동성이 높은 재생에너지의 발전출력이 별도의 추가 설비 없이 전력계통에 바로 연계되면, 주파수 변동, 전압 변동 등 전력 품질이 저하되는 현상이 발생할 수 있다 [1]. 특히, 기저 발전을 담당하고 계통 관성을 유지하는 원자력 및 석탄 발전의 전력 생산이 감소하고, 대규모 재생에너지 발전단지를 구축하여 전력을 생산하려는 상황에서 계통 안정성의 중요성은 더욱 높아지고 있다. 이러한 이유로, ESS의 화재 발생 등 해결해야 할 과제가 상존함에도 불구하고 재생에너지의 보급과 설비 구축을 위해서는 에너지저장장치가 반드시 요구된다 [2-4].

현재, 해상풍력 및 육상태양광 재생에너지의 출력안정화에 필요한 에너지저장장치의 용량은 발전단지가 대규모화 됨에 따라 점점 증가하고 있다. 이러한 추세 속에서 한정된 면적에 제품을 설치하기 위하여 ESS는 점점 고(高) 용량화 및 소형·경량화 되고 있다 [5]. ESS 제품 크기의 축소는 배터리 및 전력변환장치(Power Conditioning System, PCS) 설치를 용이하게 하고, 설치 비용을 저

감하는데 도움이 되지만, 전위차를 가진 도체부의 절연 이격거리가 감소하기 때문에, 설비 전체의 절연내력이 저하되는 현상이 발생할 수 있다 [6, 7]. 특히, 배터리 보호장치에서 도체부 및 MC (Magnetic Contactor)와 같은 릴레이를 고정하기 위하여 사용되는 고체절연물의 표면은 공기보다 낮은 절연성을 가지기 때문에, 운전 중 발생하는 결로와 오손 및 과도전압에 대하여 절연적으로 더 취약한 특성을 보일 수 있다 [8, 9].

배터리와 PCS 등 ESS 제품 외함의 IP 등급이 안전성 시험 규격을 바탕으로 운전 환경에서 설비에 발생하는 오손과 결로를 저감하기 위하여 상향 조정되고 있지만, 이러한 제품 설계 방향은 운영에 따른 고체절연물 표면에 의한 절연내력 저하와 반복적인 절연파괴를 초래할 수 있는 표면 특성 변화 등을 반영하지 못하는 어려움이 있다 [10]. 그러므로 실제 운전 중 불가피하게 발생하는 결로와 오염 조건에서 ESS 설비의 신뢰성을 높이기 위하여 고체절연물 연면 절연파괴특성에 대한 연구가 우선적으로 필요하다.

본 논문에서는 배터리 등 ESS 설비에 발생할 수 있는 다양한 오염 조건과 결로 상황을 모의하고, 평판전극 조건에서 AC 전압과 정극성 임펄스 시험파형에 대한 고체절연물 재질 별 연면 절연파

Article Information

Manuscript Received Jan 27, 2021, Accepted September 27, 2021, Published online December 30, 2021

The Authors are with KEPCO Research Institute, Korea Electric Power Corporation, 105 Munji-ro Yuseong-gu, Daejeon 34056, Republic of Korea.

Correspondence Author: Jin-Tae Kim (outofkim@kepco.co.kr)

ORCID: 0000-0001-5723-7234 (Jin-Tae Kim); ORCID: 0000-0002-4280-0220 (Seung-Yong Lee); ORCID: 0000-0002-4109-6083 (Ji-young Kim); RCID: 0000-0002-9185-6124 (Bok Yeol Seok);



This paper is an open access article licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International Public License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>

This paper, color print of one or more figures in this paper, and/or supplementary information are available at <http://journal.kepco.co.kr>.

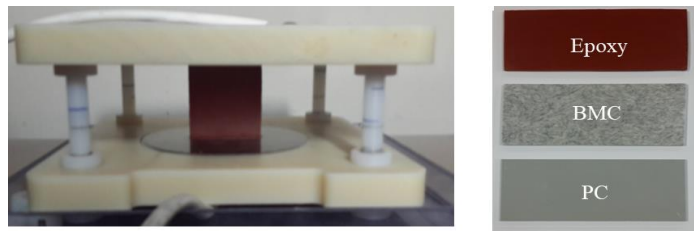


Fig. 1. Electrode system

TABLE 1
Experimental configuration

| | |
|-----------------------------|--|
| Electric field Distribution | Uniform field |
| Material | Epoxy, BMC+0%ATH, BMC+40%ATH, PC |
| Gap distance | 52.5mm |
| Experimental waveform | Lightning Impulse(LI), Sinusoidal AC voltage |
| Contamination level | Clean, Light, Medium |

괴전압을 실험적으로 분석한 후, 절연파괴 진전현상과 표면 접촉각 측정을 통한 절연파괴 전후의 소수성 변화를 고찰하였다.

II. 실험 전극 및 실험 방법

본 논문에서 시료로 사용되는 고체절연물 재질에는 그림 1에서 확인할 수 있는 바와 같이 VCB(Vacuum Circuit Breaker), ESS의 보호장치(Battery Protection Unit, BPU) 등 전력기기에 많이 활용되고 있는 엔지니어링 플라스틱 계열의 BMC(Bulk Molding Compound)와 PC(PolyCarbonate) 및 비교 시료로서 에폭시 등이 사용되었다. 특히, BMC의 경우, 마이크로 크기의 첨가제가 원가절감 목적으로 BMC 제조에 사용되며, ATH(Alumina-TriHydrate)가 40% 첨가된 BMC 시료가 본 실험을 위하여 제작되었다. 전극간 연면거리는 고체절연물 재질의 표면 절연파괴특성을 분석하기 위하여 52.5mm로 고정되었고, 평판전극이 실험에 활용되었다. 현재까지 ESS 설비에서 발생하는 오염 정도가 많이 알려져 있지 않기 때문에, 표 1에서 볼 수 있는 것처럼, 고체절연물 표면의 오손은 IEC 60815 규격을 바탕으로 light와 medium 조건에 해당하는 전기전도도를 가진 현탁액을 사용하여 모의되었다 [11, 12]. 결로가 고려된 오염된 고체절연물 표면의 절연내력을 분석하기 위하여 분무기를 활용하여 표면에 물방울과 수분을 형성하였다. 이때, 물방울과 수분은 표면에 충분히 균일하게 형성되었다.

표준 임펄스 시험기와 AC 내전압 시험기가 그림 2에서 볼 수 있는 바와 같이 운전 환경에서 발생할 수 있는 전기적 과도상태와 운전 전압에 대한 절연내력을 분석하기 위하여 사용되었다. 1.2/50s의 표준 임펄스 시험파형이 인가되었고, up and down 방법을 활용하여 50% 절연파괴전압을 측정하였다. AC 표면 절연파괴 실험의 경우, 단시간 시험 방법이 활용되었고, AC 전압은 1kV/s 속도로 승압되어 인가되었다. 시험 파형 별 각 조건마다 시험은 15회씩 수행되었고, AC 절연파괴전압은 최대값과 최소값을 제외한 나머지 실험값들의 평균을 의미한다.

절연파괴에 따른 고체절연물 표면 변화를 관찰하기 위하여 표면의 접촉각을 측정하였다. 접촉각은 KS L 2110과 이전 연구에서 사용된 방법을 바탕으로 스포이드를 활용하여 4μl의 물방울을 시

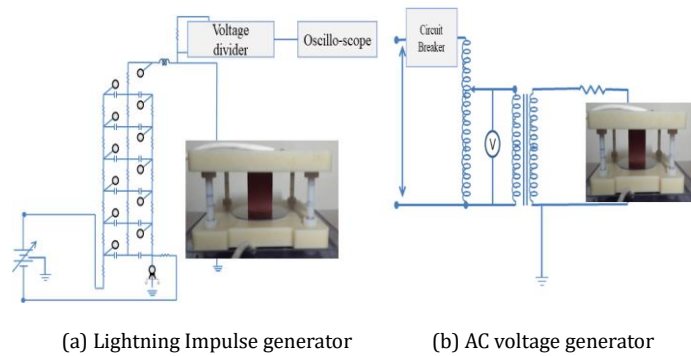


Fig. 2. Facility for LI and AC test

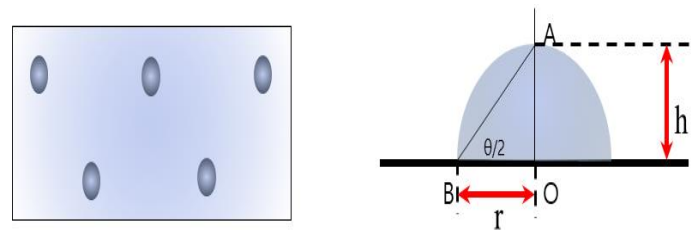


Fig. 3. Contact angle measurement

료 표면의 5 부위에 뿌린 후, 그림 3에서 볼 수 있는 바와 같이 삼각함수의 원리에 따라 계산되었으며, 접촉각은 5개 부위의 평균값을 의미한다 [13, 14].

ESS 보호시스템의 성능은 해석을 통하여 분석이 가능하다. 그러나, 고장전류 차단 시 발생하는 아크 전압 및 아크 소호 시간(Arc extinction time) 등 차단특성은 해석에 정확하게 반영되기 힘들기 때문에, 차단 과정에서 발생하는 과도전압과 고장전류를 해석적으로 예측하는 것은 매우 어렵다. 이런 이유로 본 논문에서는 AC 1선 지락과 선간 단락 고장을 모의한 후, ESS 보호시스템의 성능을 실험적으로 분석하였다.

III. 실험 전극 및 실험 방법

A. 시험파형 별 연면 절연파괴에 대한 고체절연물 재질의 영향 분석

본 절에서는 운전 조건을 고려한 다양한 표면 오손 조건에서 인가된 시험파형에 따라 고체절연물 연면 절연파괴특성을 분석하였다. 우선, AC 전압이 인가된 경우, 각 오염 조건에서 고체절연물의 연면 절연파괴전압은 그림 4의 (a)에서 확인할 수 있는 바와 같이 재질에 영향을 받음을 확인할 수 있었다. 모든 표면 오손도 조건에서 PC의 AC 절연파괴전압이 다른 재질 대비 가장 높았다. 또한, 첨가제가 포함되지 않은 BMC의 AC 절연파괴전압은 동일 오손 조건에서 에폭시 보다 낮았지만, ATH가 40% 첨가된 BMC의 AC 절연파괴전압은 에폭시보다 높은 특성을 보였다. 정극성 LI 전압 인가 조건에서 고체절연물의 연면 절연파괴특성은 AC 전압 인가 조건에서의 실험결과와 다른 특성을 보였다. 즉, 모든 표면 오손 조건에서 LI 연면 절연파괴전압은 재질의 영향을 거의 받지 않았으며, 표면 오손도가 증가함에 따라 거의 동일한 비율로 연면 절연파괴전압이 감소하는 경향성을 보였다. 또한, AC 인가 조건과 달리, BMC에 첨가된 ATH는 LI 연면 절연파괴전압에 거의 영향을 미

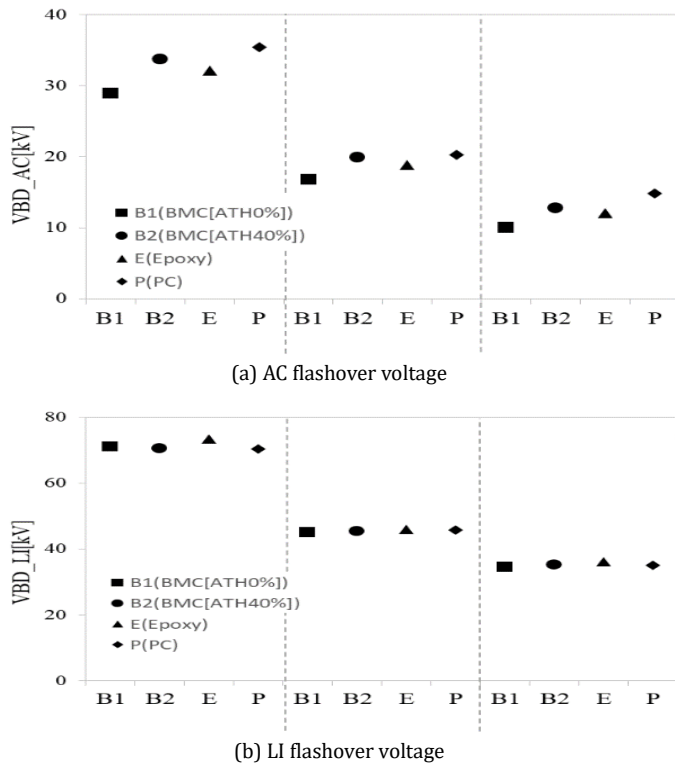


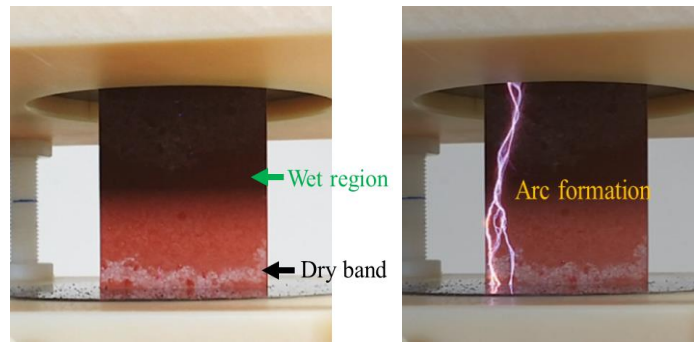
Fig.4. Flashover characteristics according to voltage waveforms and materials in various contamination conditions

치지 않았으며, ATH 함유에 따른 절연성능 강화는 시험전압의 파형 및 인가 시간과 관련이 있음을 확인할 수 있었다. 반면에, AC 연면 절연파괴특성은 오손도 뿐만 아니라 고체절연물의 재질에 영향을 받음을 확인할 수 있었다.

B. AC 전압 인가 조건에서 연면 절연파괴 진전특성에 대한 재질 영향 분석

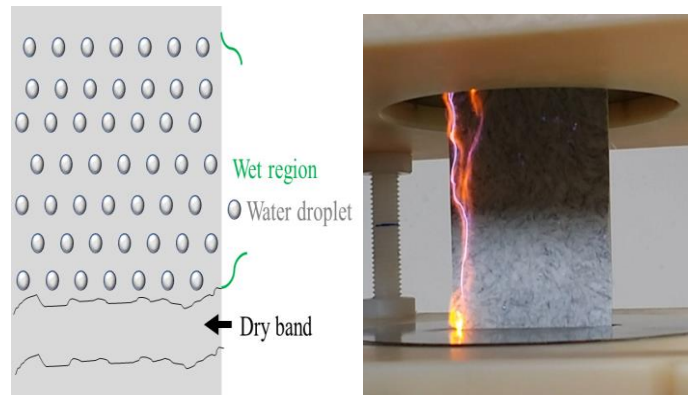
결로와 Medium 조건으로 오손된 고체절연물 표면에서 AC 연면 절연파괴 진전특성에 대한 재질의 영향을 방전 패턴을 분석함으로써 고찰하였다. 우선, 에폭시의 경우, 기존에 알려진 것처럼, AC 전압 인가 이후 건조대가 전극 부근 표면에 형성되었다. 시간이 지남에 따라 건조대 영역이 점점 확대된 후, 보라색 빛을 방출하는 방전이 표면을 따라 순간적으로 발생하여 진행함을 확인할 수 있었다. 그러나, 절연파괴 이후 탄화로(Tracking)는 관찰할 수 없었다. BMC의 경우에도 그림 5의 (b)의 묘사도(Sketch)에서 확인할 수 있는 바와 같이, 절연파괴 직전 건조대가 먼저 발생하는 것을 확인할 수 있었으나 BMC 색상과 건조대의 생상대비가 명확하지 않아 사진으로 뚜렷하게 확인하기 어려웠다. 스트리머 채널의 색을 고려했을 때 에폭시와 BMC에서 발생하는 방전과 유사한 특성이 나타남을 확인할 수 있었다. 그러나 절연파괴 이후 에폭시의 표면과는 달리, BMC 표면에는 국부적인 탄화점이 형성되어 있음을 확인할 수 있었다.

PC의 경우에는 AC 연면 절연파괴 진전특성이 에폭시 및 BMC와 완전히 상이하였다. AC 전압이 인가됨에도 불구하고 건조대는 형성되지 않았으며, 국부적인 방전이 표면 전체에 대하여 산발적으로 발생하였다. 이들 국부적인 방전점들은 빛을 방출하는 동시에 탄화점을 형성하며 인접 부위를 향해 성장하였다. 이후, 인접한



절연파괴 직전 에폭시 표면 변화 AC 연면 절연파괴 진전 이미지

(a) 에폭시 연면 절연파괴 진전과정



절연파괴 직전 BMC 표면 변화(Sketch) AC 연면 절연파괴 이미지

(b) BMC의 연면 절연파괴 진전과정

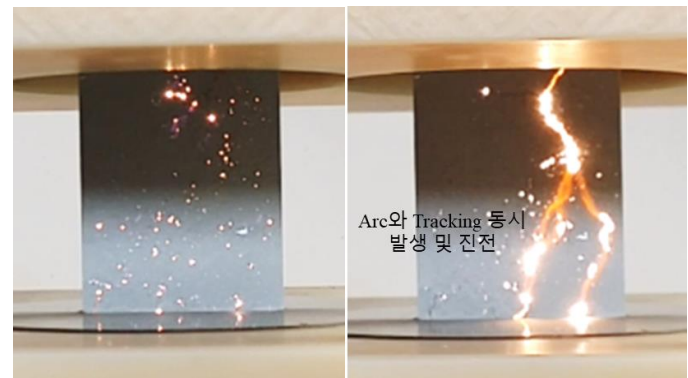
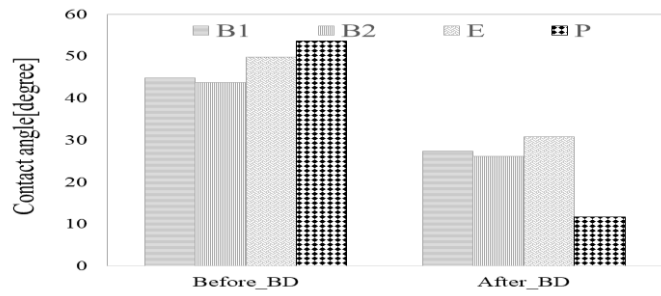
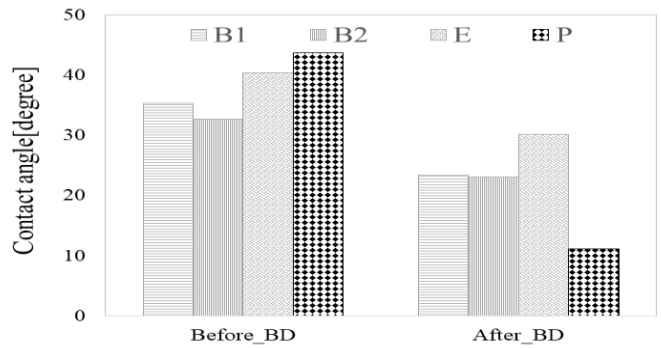


Fig.5. AC Flashover propagation characteristics varying with the solid insulator

다른 미소 방전점과 연결되며, 부분적으로 수지상의 도전로를 형성하였다. 이러한 수지상의 도전로들이 그림 5의 (C)에서 볼 수 있는 바와 같이 상호 연결되며 전극 간 완전한 절연파괴를 일으킴을 확인할 수 있었다. 또한, 수지상의 도전로들을 연결하는 방전은 상대적으로 더 강한 빛을 방출하였다. 그리고, PC 표면에서 발생하는 스트리머는 에폭시와 BMC에서 발생한 스트리머와 달리 수지 표면의 탄화 유발과 그에 따라 원활히 진행하기 때문에, 색온도가 더 낮은 빛을 방출하였다. 이러한 순차적인 PC의 연면 절연파괴 진전특성이 PC 표면에서 완전 절연파괴로 연결되는데 소요되는 시간에 영향을 주고 있음을 확인할 수 있었다.



(a) Light 오염 조건



(b) Medium 오염 조건

Fig. 6. Contact angle varying with materials in various surface contaminations

C. 다양한 오손 조건 별 고체절연물 표면에 대한 연면 절연파괴 영향 분석

다양하게 오손된 표면에서 수분의 분산에 영향을 주는 고체 절연물 표면 특성인 소수성에 대한 연면 절연파괴 영향을 접촉각 측정과 분석을 통하여 고찰하였다. 그림 6에서 확인할 수 있는 바와 같이, AC 절연파괴 실험이 수행되기 전, 고체절연물 표면의 초기 접촉각은 재질과 표면 오손도에 모두 영향을 받았으며, 표면 오염도가 Light 조건에서 Medium 조건으로 증가함에 따라 고체절연물 표면의 접촉각은 모든 재질에서 유사하게 약 23% 감소하였다. 또한, 동일한 각 오손 조건에서 PC의 접촉각은 다른 고체절연물 대비 가장 높았으며, 모든 오염 조건에서 절연능력이 우수한 에폭시에 비해서도 8% 이상 높은 것을 확인할 수 있었다. AC 연면 절연파괴가 표면에 발생한 이후, PC의 접촉각은 AC 연면 절연파괴 전 기준 대비 약 75% 감소하였고, 다른 고체절연물과 비교하여서도 가장 많이 저하됨을 확인할 수 있었다. PC를 제외한 나머지 고체절연물의 표면 접촉각은 AC 연면 절연파괴 발생 전 대비 약 35% 정도 감소함을 알 수 있었다. BMC의 경우, AC 연면 절연파괴가 발생하기 전에는 ATH 첨가제가 없는 BMC의 접촉각이 첨가제가 있는 경우보다 높았으나, AC 연면 절연파괴가 발생한 후, 두 재질의 접촉각이 거의 유사하게 됨을 확인할 수 있었다. 본 실험결과로부터 AC 연면 절연파괴 이후, 접촉각 변화는 재질 별 연면 절연파괴 진전특성과 관련이 있음을 확인하였고, 특히, PC의 급격한 접촉각 감소는 지속적인 국부 방전 및 탄화로 형성에 따른 표면의 소수성 상실과 친수성 형성에 따른 전기전도도 증가와 관련이 있었다. 또한, 친수성 표면 형성으로 인하여 절연파괴가 좀 더 쉽게 발생할 수 있을 것으로 예측되었다[15].

IV. CONCLUSION

본 논문에서는 운전 환경에서 불가피하게 발생할 수 있는 고체절연물 표면의 오손과 결로로 인하여 발생하는 절연내력 저하로부터 ESS의 절연신뢰성과 안정성을 높이는 연구의 일환으로 평등전계 분포에서 시험 파형 별 고체절연물 표면의 연면 절연파괴특성을 분석하고, 표면 접촉각 측정을 통하여 연면 절연파괴 전과 후의 표면 소수성 변화를 고찰하였다.

- (1) 정극성 LI 임펄스 전압에 대하여 연면 절연파괴전압은 재질의 영향을 거의 받지 않았지만, 표면 오손도가 증가함에 따라 감소하는 특성을 보였다. 그러나 AC ramp 전압 인가 조건에서 연면 절연파괴전압은 표면의 오손도 뿐만 아니라 고체절연물의 재질에 따라 달라짐을 확인할 수 있었다. 특히, 모든 오손도 조건에서 PC의 AC 절연파괴전압은 다른 재질보다 높음을 알 수 있었다.
- (2) 에폭시와 BMC 표면에서 발생하는 AC 연면 절연파괴는 건조대가 형성된 후 발생하였으며, 이때 발생한 스트리머는 보라색을 띄며, 순간적으로 발생하였다. 그러나 PC의 경우, AC 연면 절연파괴는 건조대의 형성 없이 연속적인 미소방전과 탄화로 형성에 의하여 전극 간 완전 절연파괴로 이어졌으며, 연면 절연파괴 과정에서 스트리머가 표면과의 상호작용에 의해 진전하였기 때문에, 절연파괴가 발생하고 지속되는 과정이 상대적으로 길었다.
- (3) AC 연면 절연파괴 이후, 고체절연물 표면의 접촉각은 주어진 모든 표면 오손 조건에서 전체적으로 감소하는 경향성을 보였으며, 특히, PC의 표면 접촉각은 다른 고체절연물 대비 가장 많이 감소하였다. 이러한 특성은 다른 고체절연물 재질과 달리 절연파괴 과정에서 형성되는 탄화물과 도전로에 의하여 표면이 소수성에서 전기전도도가 좋아지는 친수성으로 바뀌고, 강한 방전에 노출되는 것과 관련이 있었다. 또한, 첨가제가 포함된 BMC의 표면 접촉각은 AC 연면 절연파괴 이후 첨가제가 없는 경우와 유사한 특성을 보였다.

본 연구는 현재 재생에너지 발전단지와 함께 설치되고 있는 ESS의 절연신뢰성을 높여 재생에너지 발전원을 보급하는데 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by Korea Electric Power Research Institute(KEPRI) to analyze the cause of ESS accidents and Thank you very much.

본 연구는 한국전력연구원의 연구비에 의해 지원되었음

REFERENCES

- [1] S.D. Ahmed, F.S.M. Al-Ismael, M. Shafiullah, and F.A. Al-Sulaiman, "Grid Integration Challenges of Wind Energy : A Review," IEEE Access, Vol. 8, pp. 10857-10878, January, 2020, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2964896>.
- [2] F. D. Gonzalez, A. Sumper, O. G. Bellmunt, and R. V. Robles, "A review of Energy Storage Technologies for Wind Power Applications," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 16, no. 4, pp 2154-2171, May, 2012, <http://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.029>.

- [3] H. Kazari, H. Oraee, and B.C. Pal, "Assessing the Effect of Wind Farm Layout on Energy Storage Requirement for Power Fluctuation Mitigation," *IEEE Trans. On Sustainable Energy*, Vol. 10, Issue 2, pp. 558-568, April, 2019, <https://doi.org/10.1109/TSTE.2018.2837060>.
- [4] Q. Jiang, H. Wang, "Two Time Scale Coordination Control for a Battery Energy Storage System to Mitigate Wind Power Fluctuations," *IEEE Trans on Energy Conversion*, Vol. 28, No. 1, March, 2013, <https://doi.org/10.1109/TEC.2012.2226463>.
- [5] J. T. Kim, S. Y. Lee, J. Y. Kim, and B. Y. Seok, "Design of ESS Power Energy Capacity for Mitigation of Long-term Intermittent Wind Power Fluctuation," *Trans. KIEE*, vol. 69P, no. 3, pp175-180, 2020. <https://doi.org/10.5370/KIEEP.2020.69.3.175>.
- [6] J. T. Kim, S. Y. Lee, and S. Y. Kim, "Analysis on Insulation and Protection Characteristics of Grid connected ESS in Ground/ Short-Circuit Fault," *Kepeco Journal*, vol. 6, no. 2 pp. 119-122, Sept. 2020. <https://doi.org/10.18770/KEPCO.2020.06.02.119>.
- [7] J. T. Kim, S. Y. Lee, S. Y. Kim, and B. Y. Seok, "Analysis on AC Electrical Breakdown Characteristics of Insulation Barrier for Improvement of ESS," *Trans. KIEE*, vol 69. no. 4, April, 2020. <https://doi.org/10.5370/KIEE.2020.69.4.581>.
- [8] L. He, R.S. Gorur, "Source Strength Impact Analysis on Insulator Flashover under Contaminated Conditions," *IEEE Trans., DES*, vol. 23, issue 2, 2016. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2015.005264>.
- [9] M. Hussaain, S. Farokhi, S. G. Mcmeekin, and M. Farzaneh, "Observation of Surface Process on high Voltage Polluted Inulators near Shoreline," *IEEE. inter. conf. on Delectrics*, 2016. <http://doi.org/10.1109/ICD.2016.7547728>.
- [10] UL-1973, "Standard for safety, batteries for use in Light Electric Rail(LER) Application and Stationary Application," 2017.
- [11] IEC-60815 : Guide for the Selection and Dimensioning of High-voltage Insulator, 2008.
- [12] R. Matsuoka, K. Kondo, Y. Mizuni, and T. Terada, "Accessment of basic Contamination Withstand Voltage Characteristics of Polymer Insulator," *IEEE Trans., Power Del.* vol. 11, 1996. <https://doi.org/10.1109/61.544273>.
- [13] B. Dong, X. Jiang, J. Hu, and C. Sun, "Effect of Artificial Polluting Methods on AC Flashover Voltage of Composite Insulators," *IEEE, Trans., Dielectric. Electr. Insulation*, vo. 19, no. 2, 2012. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2012.6180267>.
- [14] KSL 2110, "Testing method of Wettability of Glass Substrate"
- [15] X. Yu, Q. Zhang, X. Yang, H. Yang, J. Zhou, B. Liu, "Influence of non-uniform Hydrophobicity Distribution on Pollution Flashover Characteristics of Composite Insulators," *IET Sci. Measur. & Tech.* vol. 12, Issue 8, 2018. <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2018.5266>.